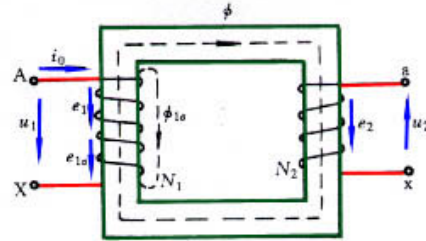


复习磁路的概念：



磁路：磁通所通过的路径。

主磁通：由于铁心的导磁性能比空气要好得多，所以绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通。

漏磁通：围绕载流线圈、部分铁心和铁心周围的空间，还存在少量分散的磁通，这部分磁通称为漏磁通。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

主磁路：主磁通所通过的路径。

漏磁路：漏磁通所通过的路径。

励磁线圈：用以激励磁路中磁通的载流线圈。

励磁电流：励磁线圈中的电流。



直流:直流磁路

例如:直流电机

交流:交流磁路

例如:变压器

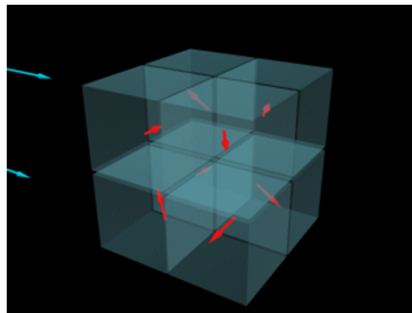
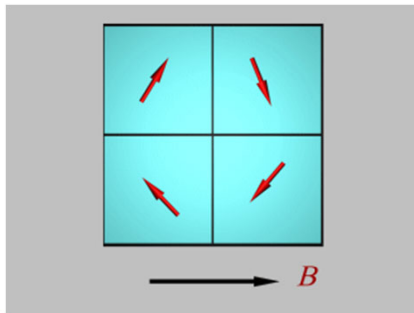


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV. 铁磁材料的 $B-H$ 曲线

- 铁磁材料的**磁化**：内部**磁畴**在**外界**磁场的作用下，原本**无序**排列的轴线逐渐趋于**一致**，形成一个**附加磁场**，叠加于外磁场，对外表现为**合成磁场**大大加强。而**非铁磁材料**无附加磁场。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

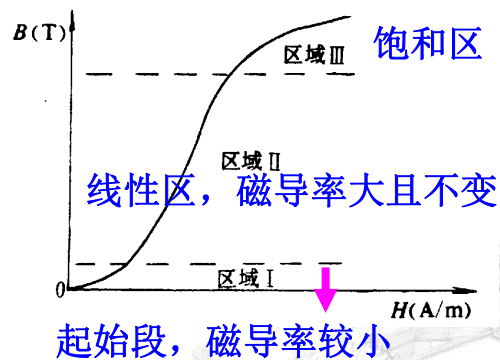
IV. 铁磁材料的 $B-H$ 曲线

- **磁化曲线**：铁磁材料磁化过程中，材料中的磁通密度 B 与外界磁场强度 H 之间的关系，也称为 $B-H$ 曲线，它是**磁性材料最基本的特征**。

- 同一材料当其磁通密度不同时，有不同的磁导率

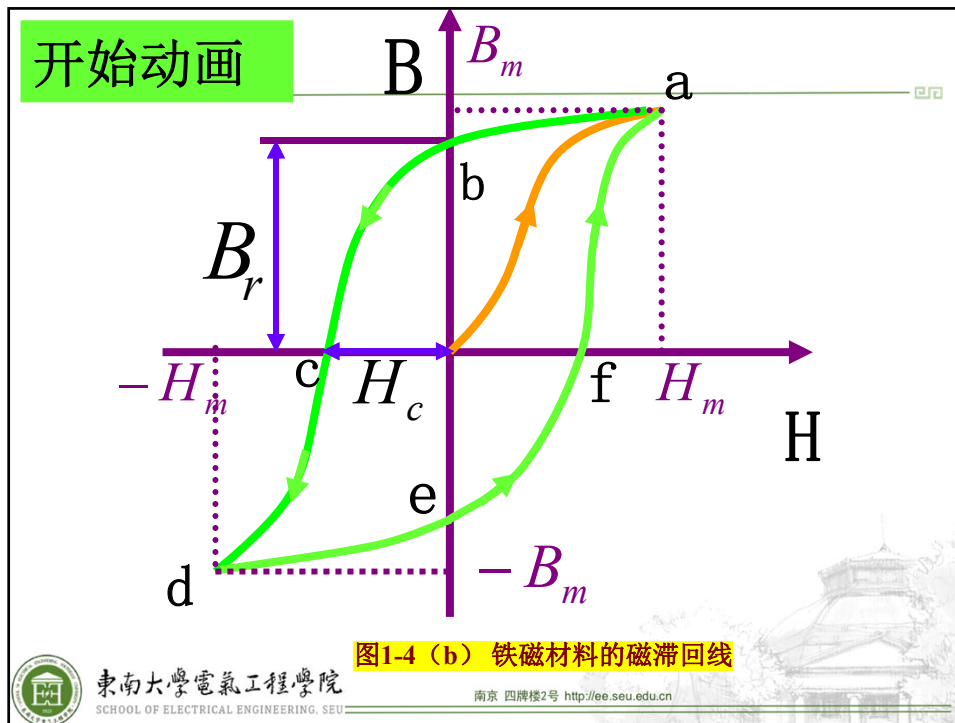
$$\mu_{Fe} = f(H)$$

- 不同的磁性材料有不同的磁导率



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

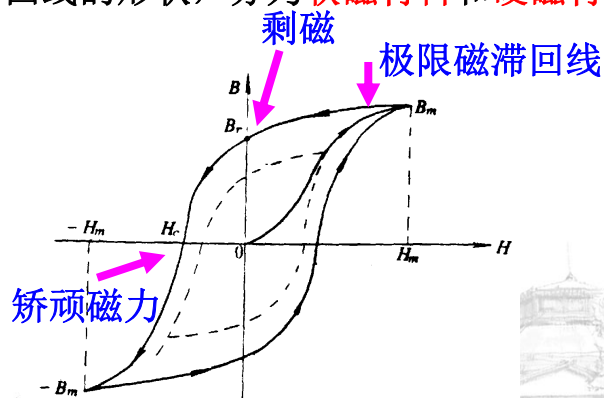


IV. 铁磁材料的 $B-H$ 曲线

➤ 磁滞现象与磁滞回线

- 磁场强度 H 缓慢循环变化, $B-H$ 曲线是一闭合曲线
- 根据 H_c 和磁滞回线的形状, 分为软磁材料和硬磁材料

电机铁芯
采用**软磁材料**！



1. 软磁材料

定义：磁滞回线窄、剩磁和矫顽力都很小的材料。

附图1-4 (a) 见下一页ppt

常用软磁材料：铸铁、铸钢和硅钢片等。

软磁材料的磁导率较高——制造电机和变压器的铁心

2. 硬磁(永磁)材料

定义：磁滞回线宽、剩磁和矫顽力都很大的铁磁材料，又称为永磁材料。

附图1-4 (b) 见下一页ppt

磁性能指标 { 剩磁
矫顽力
最大磁能积



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

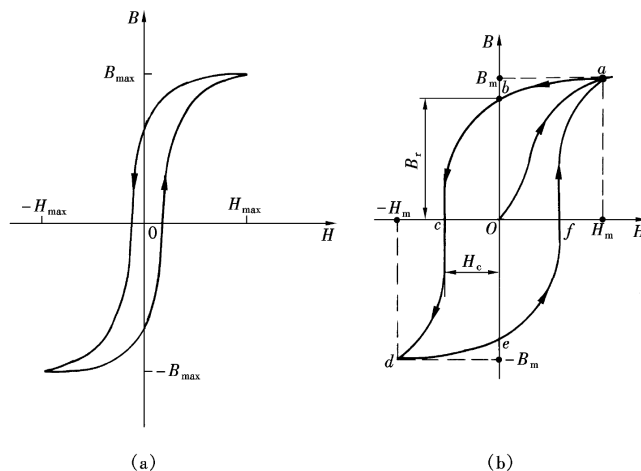


图 1-4 磁滞回线曲线

(a) 软磁材料；(b) 硬磁材料



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

V. 铁芯损耗 P_{FE}

- 当导磁材料位于**交变磁场**中被反复磁化， **$B-H$** 曲线呈磁滞回线。导磁材料中将引起**能量损耗**，称为**铁芯损耗**。铁芯损耗分为两部分：**磁滞损耗**和**涡流损耗**
- **注意**：在恒定磁场中的静止导磁体内是不会引起能量损耗的
- **铁芯损耗**均转化为**热能**使铁芯温度升高，为防止电机过热，采用**硅钢片**以减小铁芯损耗，采取散热降温措施



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

V. 铁芯损耗 P_{FE}

• 铁芯损耗 (core losses)

➤ 磁滞损耗 (hysteresis loss)

磁滞回线包含的面积，难以准确计算，工程上用经验公式进行计算

$$P_h = k_h V f B_m^n$$

涡流损耗 (eddy current loss)

涡流—交变磁场在铁芯内产生自行闭合的感应电流

涡流损耗是一种焦耳损耗，大小与涡流流过的路径有关，即电阻有关。正弦波电流所产生的交变磁场中的铁芯涡流损耗

$$P_e = k_e V f^2 \tau^2 B_m^2$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

VI. 安培环路定律(全电流定律)

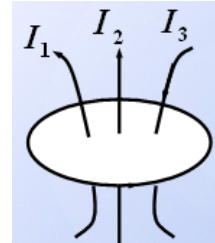
- H 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径的限定面积中流过电流的代数和，且积分回路的绕行方向和产生该磁场的电流方向符合**右手螺旋定则**

$$\oint_l Hdl = \sum_{k=1}^n I_k$$

- **磁位差(磁压)**: H 沿一条路径 l 的线积分，

符号 U_M ，单位 **A**

$$U_M = \int_l Hdl$$



- **磁动势(magnetic-motive-force)**: 磁场回路所匝链的电流，

符号 F ，单位 **A**

$$\sum F = \sum I_k$$

- **全电流定律**: 沿着磁场中任一闭合回路，其总磁压等于总磁动势

$$\sum U_M = \sum I_k = \sum F$$



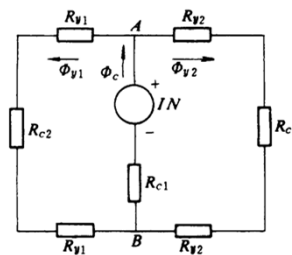
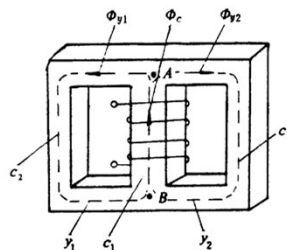
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

VII. 磁路基本定律

(1). 磁路欧姆定律

认为磁通完全在导体内部通过；假设在铁芯柱截面上 B 为均匀分布



$$\Phi_{c1} = B_{c1} S_{c1}$$

$$U_{Mc1} = H_{c1} l_{c1} \rightarrow R_{c1} = \frac{U_{Mc1}}{\Phi_{c1}} = \frac{H_{c1} l_{c1}}{B_{c1} S_{c1}} = \frac{l}{\mu S}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

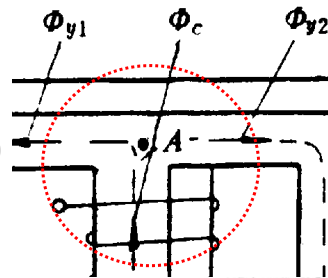
VII. 磁路基本定律

(2). 磁路基尔霍夫定律

➤ 磁路基尔霍夫第一定律

流入磁路节点的磁通代数和等于零

$$\sum \Phi = 0 \rightarrow \Phi_c - \Phi_{y1} - \Phi_{y2} = 0$$



➤ 磁路基尔霍夫第二定律

沿着任一闭合回路，其总磁压等于总磁势

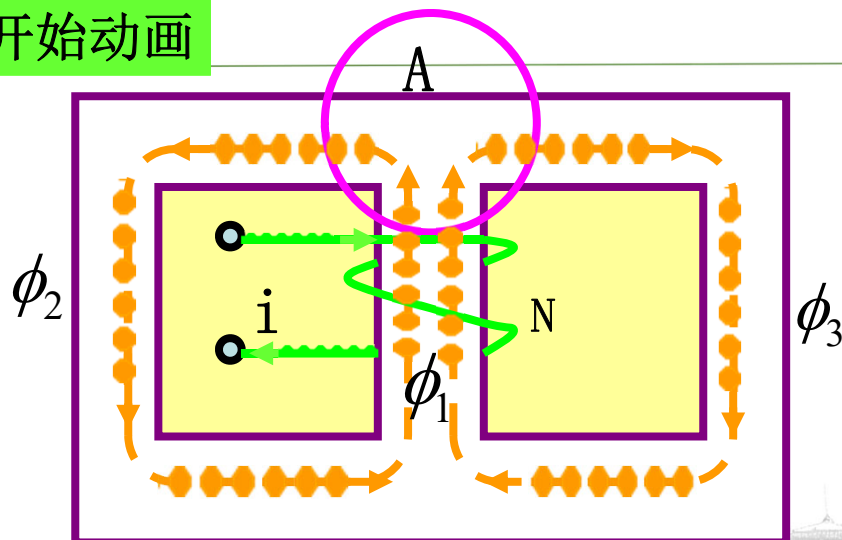
$$\rightarrow \sum U_M = \sum I_k = \sum F$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

开始动画



磁路的基尔霍夫第一定律



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

开始动画

Diagram illustrating the magnetic circuit for the second law of Kirchhoff's law. The circuit consists of a rectangular core with a central vertical leg and two horizontal legs. A current i flows through a coil with N turns wound around the central leg. The magnetic field H_1 and length l_1 are indicated for the top horizontal section. The magnetic field H_2 and length l_2 are indicated for the bottom horizontal section. A gap δ is shown on the right vertical leg.

磁路的基尔霍夫第二定律

VII. 磁路基本定律

电路与磁路的类比 $p.16\sim17$


磁路	电路
磁通 Φ	电流 i
磁动势 F	电动势 e
磁阻 R_m	电阻 R
磁压降 Hi	电压降 u
磁导 Λ_m	电导 G
欧姆定律 $\Phi = F/R_m$	欧姆定律 $i = u/R$
基氏第一定律 $\Sigma \Phi = 0$	基氏第一定律 $\Sigma i = 0$
基氏第二定律 $\Sigma F = \Sigma Hi = \Sigma \Phi R_m$	基氏第二定律 $\Sigma e = \Sigma u = \Sigma iR$

東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1	试题	在磁路中，与电路中的电流作用相同的物理量是（ ）。
	选项	A磁阻 B 磁通密度 C磁通 D磁动势
2	试题	当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时，磁路计算能否采用叠加原理？为什么？
	答案	不能，因为磁路是非线性的，存在饱和现象



 东南大学电气工程学院
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

VIII. 磁场储能 w_m

- **磁场**是一种**特殊**形式的物质，磁场中能够储存能量。在磁场建立过程中，能量由外部能源转换而来
- **电机**—通过**磁场储能**来实现**机、电能量转换**
- **体积能量密度** $w_m = \frac{1}{2} B H$

对于**线性**介质： $w_m = \frac{1}{2} B H = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0}$

- **磁场总储能** $W_m = \frac{1}{2} \int_V B H dV$
- **磁场能量主要存储在气隙中**


 东南大学电气工程学院
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>